

Trabajo Fin de Máster

Calidad de aire e higiene en equipos de
climatización por aire. Impacto sobre diseño y
eficiencia energética

Air quality and health in HVAC. Impact on design
and energy efficiency

Autor

Miguel Pascual Magallón

Director

Carlos Monné Bailo

Titulación del autor

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Año 2020

Calidad de aire e higiene en equipos de climatización por aire. Impacto sobre diseño y eficiencia energética

Introducción

Los sistemas de climatización pueden suponer una fuente de contaminación debido a la posible formación de bacterias y microorganismos en su interior. Por ello resulta importante su estudio.

El presente proyecto persigue tres objetivos fundamentales:

- Estudio de posibles contaminantes en locales climatizados por aire.
- Estudio de posibles focos de contaminación y mecanismos de mejora de calidad de aire en sistemas de climatización.
- Impacto energético de las medidas propuestas.

El presente documento se encuentra estructurado de acuerdo a los objetivos anteriores. Se empieza estudiando los distintos contaminantes del aire interior, atendiendo a las características particulares de cada uno.

Se pasa a continuación a definir cuáles son los puntos más susceptibles de contaminación en los sistemas de climatización.

Tras ello se expone qué tecnologías hay disponibles en el mercado para retener y eliminar estos contaminantes.

Por último se realizan una serie de cálculos definiendo equipos y modificaciones sobre los mismos para observar qué implica el uso de una u otra tecnología sobre el consumo de las unidades climatizadoras, sobre su clase energética y sobre los costes de implementar soluciones basadas en distintos equipos de retención y eliminación de contaminantes.

Después del análisis se extraen una serie de conclusiones a la vista de los resultados y de la información encontrada.

También se incluye una pequeña referencia al prototipo que se iba a haber construido antes de la modificación del TFM debida al Covid-19.

En el documento en que se encuentran los anexos se recoge información más concreta de distintos puntos ya expuestos, con las climatizadoras y otros equipos empleados y con detalles de los cálculos realizados en el proyecto.

ÍNDICE

1. CONTAMINANTES DEL AIRE INTERIOR	2
1.1 CONTAMINANTES GASEOSOS.....	2
1.2 CONTAMINANTES EN SUSPENSIÓN EN EL AIRE	3
1.3 FACTORES DE CRECIMIENTO DE MICROORGANISMOS.....	7
1.4 POSIBLES FUENTES DE CONTAMINACIÓN EN SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN	8
2. EQUIPO DE RETENCIÓN Y ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES	10
2.1 FILTROS GENERALES	10
2.2 FILTROS ABSOLUTOS	11
2.3 FILTROS ELECTROSTÁTICOS	12
2.4 ADSORCIÓN DE GASES	13
2.5 FOTOCATÁLISIS Y DESINFECCIÓN UV	13
2.6 OZONIZACIÓN	14
3. CÁLCULOS ENERGÉTICOS Y ECONÓMICOS.....	16
3.1 CÁLCULOS DE ETIQUETA ENERGÉTICA DE CLIMATIZADORAS	17
3.2 CÁLCULOS DE COSTES DE ELEMENTOS DE FILTRADO.....	18
4. RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS	20
4.1 CLIMATIZADORA INICIAL (CASO 1)	20
4.2 INCREMENTO DE CAUDAL (CASO 2).....	21
4.3 DISMINUCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA, VELOCIDAD ALTA (CASO 3)	22
4.4 DISMINUCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA, VELOCIDAD REDUCIDA (CASO 4) .	23
4.5 CLIMATIZADORA PARA HOSPITAL, LOCALES DE CLASE II (CASO 5)	24
4.6 CLIMATIZADORA PARA HOSPITAL, LOCALES DE CLASE I (CASO 6).....	25
4.7 CLIMATIZADORA DE HOSPITAL CON DESINFECCIÓN UV (CASO 7)	26
4.8 CLIMATIZADORA DE HOSPITAL CON EQUIPO DE FOTOCATÁLISIS (CASO 8)	27
4.9 CLIMATIZADORA DE HOSPITAL CON FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO (CASO 9)..	28
4.10 ADICIÓN DE UN FILTRO ELECTROSTÁTICO (CASO 10)	29
4.11 COSTES DETALLADOS DE EQUIPOS DE FILTRACIÓN Y DESINFECCIÓN	30
5. CONCLUSIONES	32
6. PROTOTIPO DE ENSAYO. MODIFICACIÓN POR COVID-19.....	33
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1. CONTAMINANTES DEL AIRE INTERIOR

Existen diversos contaminantes del aire interior. [1] Algunos de ellos son gaseosos, mientras que otros se presentan en forma de partículas en suspensión. Dentro de las partículas, existe tanto materia no viva como microorganismos.

1.1 CONTAMINANTES GASEOSOS

Los contaminantes gaseosos están formados en su mayor parte por **gases emitidos en procesos de combustión**. En un contexto no industrial su fuente fundamental es el tabaco, además de equipos como estufas, braseros y similares.

A estos contaminantes pertenecen compuestos como CO₂, CO, SO₂, NO_x e inquemados. El primero de ellos, además de en procesos de combustión, también es producto de la respiración de los seres vivos, por lo que su acumulación en el ambiente interior suele emplearse como indicador de la calidad del aire.

Están relacionados con la aparición de problemas respiratorios, irritación y daños en órganos internos, como el hígado, los pulmones y el bazo. En el caso del CO, puede llegar a provocar incluso la muerte debido a su gran afinidad con la hemoglobina, impidiendo el acceso del O₂ al organismo a través de la sangre. Una buena ventilación mediante el correcto dimensionado del sistema de climatización de una estancia suele ser la mejor forma de evitar la acumulación de estos gases y sus efectos nocivos sobre la salud humana.

Otro gas nocivo es el **ozono**. Su alto carácter oxidante puede llegar a provocar lesiones en el aparato respiratorio (neumonitis y neumonía). Se suele generar en equipos con descargas eléctricas de alto potencial eléctrico y en algunos de radiación UV (fotocopiadoras, impresoras láser y equipos de desinfección).

Existen soluciones comerciales basadas en el ozono para desinfección del aire en sistemas de climatización, que operan durante su funcionamiento. Hay que considerar, pues, que se genere también dentro del propio sistema de climatización.

Otros gases contaminantes conforman el grupo conocido como COVs (**Compuestos Orgánicos Volátiles**). Ejemplos de estos componentes son el formaldehído, el tolueno, el xileno, el percloroetileno, el estireno, la nicotina, etc. Muchos de ellos están identificados como cancerígenos o se sospecha que lo son, y también están relacionados con afecciones del sistema neurológico.

Estos compuestos están presentes en el humo de tabaco, y en distintos materiales de construcción. En el primer caso estarán presentes siempre que haya personas fumando en una estancia, pero en el segundo siguen una emisión particular en el tiempo. Cuando un edificio es de nueva construcción o se han realizado reformas en él se alcanzan valores máximos de emisión de estos componentes. Conforme pasa el tiempo y los COVs se liberan de los materiales, su emisión se va atenuando.

Un compuesto gaseoso bastante particular es el **radón**. [2] Este gas noble proviene del radio, que a su vez se genera por la descomposición del uranio. Se trata, por tanto, de un elemento radiactivo. Tiene un período de semidesintegración de 3,8 días, por lo que desaparece mucho antes que sus elementos de origen.

En la naturaleza, el radón forma parte de la composición del terreno. En España, las zonas con mayores concentraciones de radón en su sustrato geológico son Galicia, el oeste de Castilla y León, Madrid y Extremadura.

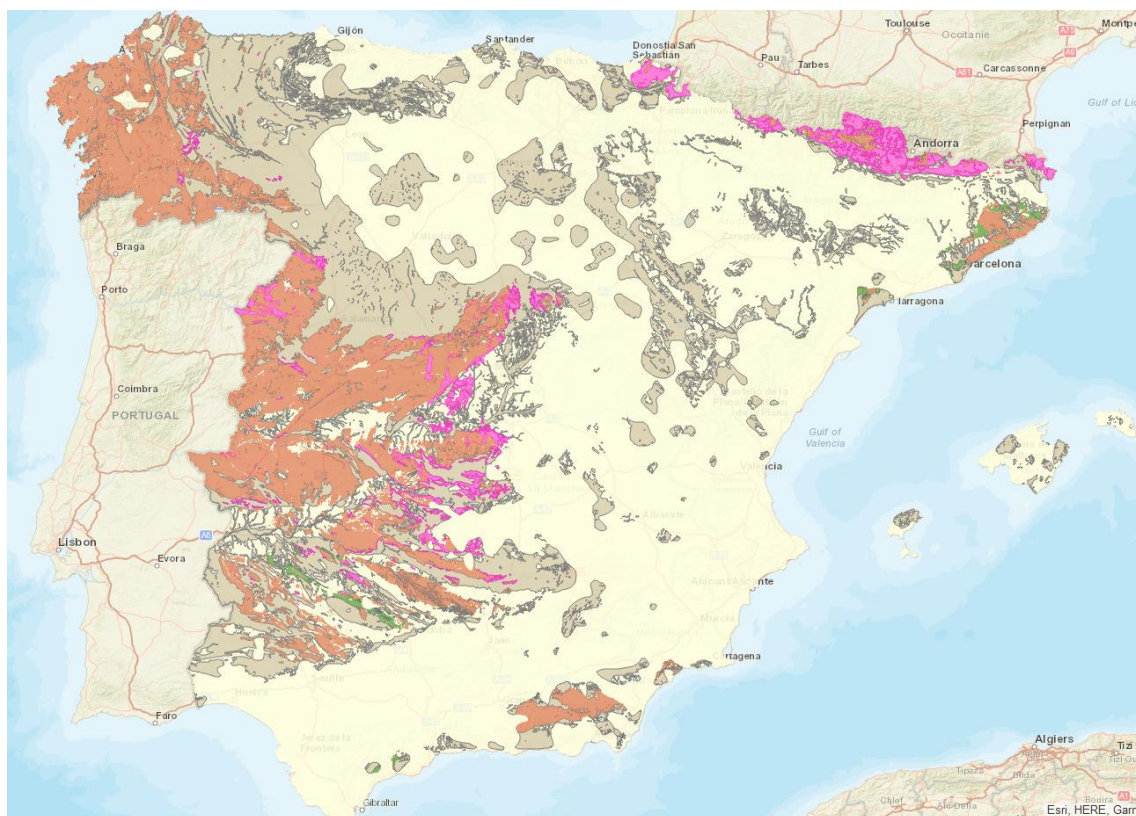


Fig. 1. Mapa del radón en la Península Ibérica y Baleares. Fuente: Consejo de Seguridad Nuclear. [3]

En exteriores no resulta un problema, pues se disipa con rapidez en el ambiente. Sin embargo, en interiores supone la segunda causa de cáncer pulmonar, por detrás del tabaco. En los edificios, es en los sótanos donde se alcanzan mayores concentraciones, disminuyendo considerablemente en pisos sucesivos.

El pasado 20 de diciembre se aprobó en el Consejo de Ministros un proyecto de modificación del CTE, en el cual se incluyen una serie de directrices destinadas a reducir la incidencia de este gas sobre la salud humana. [4] Un ejemplo de eliminación de este gas en interiores son sistemas de succión de aire en los sótanos afectados.

Todos los gases enumerados y descritos anteriormente poseen tamaños de partícula del orden de los cientos de pm. Dado su carácter gaseoso no pueden ser retenidos por filtros convencionales, por lo que la forma más efectiva de eliminarlos del interior de las estancias es el mantenimiento de una buena ventilación.

1.2 CONTAMINANTES EN SUSPENSIÓN EN EL AIRE

El resto de contaminantes del aire están conformados por sustancias no gaseosas, que se encuentran en suspensión en el aire: aerosoles y sustancias similares. Estos aerosoles pueden ser materia no viva o bien microorganismos.

Se describen brevemente a continuación cada uno de ellos.

Tabaco

Además de los compuestos derivados de la combustión y de los COVs, el tabaco es también un importante emisor de partículas al ambiente interior. Como se han detectado alrededor de unas 4.800 sustancias distintas en su composición, las cenizas y partículas

emitidas al ambiente presentan también heterogeneidad en su composición. Parte de ellas están reconocidas como cancerígenas, por lo que suponen un peligro importante para la salud humana. [5]

El tamaño de las partículas del tabaco está comprendido entre los 0,08 μm y los 0,5 μm .

Asbesto

El asbesto, también conocido como amianto, es un conjunto de minerales con buenas cualidades aislantes, debido a lo cual se empleó abundantemente en construcción en los años 70 y 80. [6]

Cuando se manipula, se producen fibras de entre 3 μm y 20 μm que, una vez inhaladas, quedan atrapadas en los alveolos pulmonares, produciendo heridas en ellos y su progresiva rigidización. Todo ello puede derivar en cáncer pulmonar.

En España fue prohibido su uso en 1987, debido a su peligrosidad. La asbestosis está reconocida como enfermedad profesional en la legislación española. Pese a ello, la existencia en la actualidad de estructuras de amianto de aquella época hace que todavía suponga un peligro para la salud la exposición al polvo de este mineral.

Bacterias

Las bacterias son los primeros microorganismos dentro de los contaminantes enumerados. [7] Éstas poseen un rango de tamaño entre los 0,3 μm y los 10 μm . Presentan distintas formas, lo cual permite clasificarlas en varias familias. Se pueden distinguir fundamentalmente 2 de ellas en sistemas de climatización.

La primera familia son los **Cocci** (Coccus). Son bacterias de forma esférica, con un tamaño que oscila entre los 0,3 μm (micrococcus) y los 3 μm .

La segunda son los **Bacillales**. Dentro de ésta están los Bacilli y los Staphylococci. Las primeras presentan un aspecto alargado, que puede formar cadenas y las segundas suelen agruparse en racimos, y su forma recuerda más a las de los Cocci, más redondeados. Sus longitudes están comprendidas entre los 0,5 μm y los 10 μm y sus anchuras entre 0,5 μm y 1 μm .

Estas bacterias son de la clase Gram-positiva, atendiendo a la tinción de Gram. El número de bacterias Gram-positivas encontradas en los sistemas de ventilación es mucho mayor al de Gram-negativas. Procede realizar esta clasificación debido a algunas características que influirán en las tecnologías para su eliminación y a la presencia de bacterias Gram-positivas y negativas en las especies estudiadas.

Estos organismos pertenecen a la clase de **bacterias mesófilas**, las cuales presentan un rango de temperatura de crecimiento entre 10 y 50°C aproximadamente, con un óptimo localizado entre los 30 y los 40°C.

El mecanismo de reproducción de estas bacterias radica en el crecimiento de una de ellas, hasta separarse en 2 nuevas independientes, de dimensiones coincidentes con la inicial. Si una de ellas accede a un punto del sistema de climatización y encuentra nutrientes y condiciones adecuadas para su crecimiento es de esperar que se extienda desde este punto hasta donde pueda llegar (hasta donde no sea retenida).

Hongos

Los hongos son microorganismos más complejos que las bacterias, y presentan un tamaño algo superior. Se agrupan en estructuras con forma ramificada, que pueden superar fácilmente los 10µm. Sus esporas (conidios) son el elemento más problemático desde el punto de vista de retención de partículas, y rondan tamaños de µm, similares a los de las bacterias.

Al igual que en el punto anterior, también aquí se puede establecer una clasificación.

La primera es la de los **Penicillium**. [8] Éstos tienen forma de pincel, partiendo de un filamento (hifa), que termina en una ramificación con forma cónica (fiálide), la cual aloja los conidios (esporas). La hifa posee un diámetro de 2 o 3 µm y una longitud de decenas de µm. La fiálide ronda una longitud de 15µm. Al igual que las bacterias anteriores, son mesofílicos, con un rango de crecimiento de 5 a 37°C (óptimo de 20 a 30) y un PH de 3 a 4,5 (puede llegar a crecer a 10).

La segunda familia es la de los **Aspergillus**. [9] Su tallo es algo más grueso que el de la especie anterior, y termina en una cabeza (que puede presentar distintas formas) sobre la que se alojan las esporas. Los rangos de tamaño de sus componentes son similares a los descritos. Suelen ser mesofílicos, aunque también hay termofílicos. Presentan un rango de temperatura de crecimiento de 10 a 60°C, con óptimos entre 25 y 42°C, y PH entre 2 y 8.

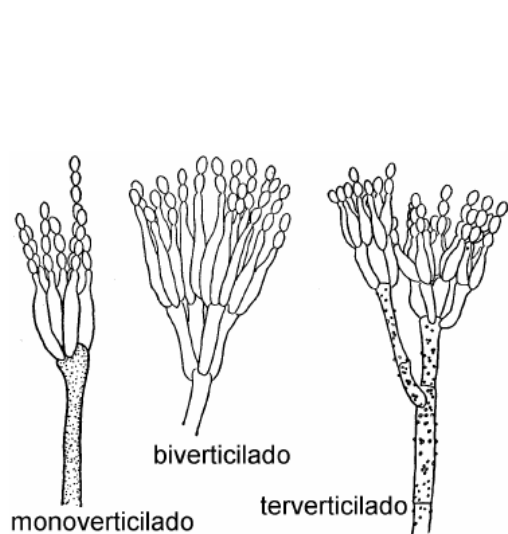


Figura 5.1. Aspecto de penicilios.

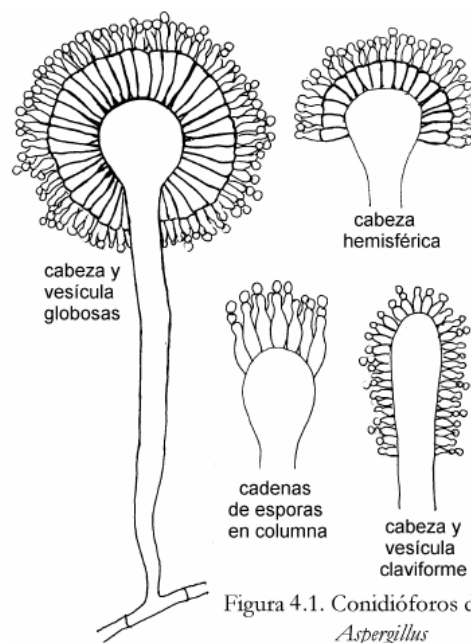


Figura 4.1. Conidióforos de *Aspergillus*

Fig. 2. Formas de hongos *Penicillium* y *Aspergillus*. Fuente: Leonor Carrillo. Los hongos de los alimentos y los forrajes. [10]

La última es la de los **Cladosporium**. [11] Presentan una forma ramificada, partiendo del tallo, el cual se divide en varias ramas para terminar alojando cadenas de conidios. Pueden crecer a temperaturas comprendidas entre -6 y 35°C, con óptimos entre 18 y 28°C.

Los conidios, causantes de la propagación de las distintas familias de hongos a lo largo del sistema de ventilación, poseen tamaños comprendidos entre 1µm y 15µm.

Virus

Se trata de los organismos más pequeños que pueden existir, y existe un conflicto acerca de si pueden considerarse o no seres vivos. Su tamaño ronda las decenas y los cientos de nm.

Su mecanismo de reproducción consiste en la infección de células y su multiplicación aprovechando los nutrientes presentes en éstas.

De cara a su retención, cabe señalar que, pese a su tamaño nanométrico, suelen estar presentes en el aire siendo transportados por otros aerosoles de tamaños mayores, entre 0,5 y 12µm.

Mención especial por la situación sanitaria global actual requiere la familia de Coronavirus, en concreto el **COVID-19 o SARS-COV-2**. [12]

El tamaño característico de los virus de la familia coronavirus ronda los 0,11µm, presentando valores de 0,1 a 0,16 µm. Son virus relativamente comunes en animales tales como camellos, vacas, gatos o murciélagos.

El COVID-19 tiene 2 mecanismos de transmisión. El primero de ellos es mediante gotas de 5 µm a 10 µm, cuyo alcance no supera 1 metro, debido a su rápida deposición sobre superficies. Es necesario evitar el contacto estrecho entre personas sin protección respiratoria para anular este mecanismo.

El segundo tiene lugar con gotas menores a 5 µm, o aerosol, cuyo alcance supera los 2 metros. Estos aerosoles son el resultado de procesos biológicos, de los seres vivos. Al toser, estornudar, etc., se produce el arrastre de microorganismos presentes en las mucosas corporales. Si un virus está presente en el producto generado existe la posibilidad de contagio por otra persona al inhalarlo. Estos contagios suelen ocurrir en espacios cerrados, con mala ventilación.

El Ministerio de Sanidad del Gobierno de España recomienda mantener entre 1 y 2 metros de distancia entre pacientes para reducir posibles contagios. Cuando se trate con personas infectadas es necesario una mascarilla con un nivel de protección FFP2 y cuando se empleen equipos de generación de aerosoles, FFP3. Este equipamiento se halla regulado en la Norma EN 149:2001+A1:2009, vigente en la actualidad.

Las categorías de filtración son 3, en función de la penetración de aerosol durante los ensayos: FFP1 (penetración máxima del 22%), FFP2 (8%) y FFP3 (2%). Desde el Gobierno de EEUU se recomienda el uso de mascarillas N-95 (con un 5% de penetración), de acuerdo con su normativa.

El Ministerio de Sanidad también establece el uso de filtros HEPA según normativa (sin más detalles), que se trata más a fondo en el siguiente punto del proyecto, en filtros absolutos. También nombra un gradiente negativo de presión de 10Pa con las habitaciones de tratamiento de los pacientes, una ventilación de 12 renovaciones de aire por hora y una esclusa (antesala) a la propia instalación.

Además de filtros mecánicos, nombra el posible uso de filtros electrostáticos y equipos de radiación UV. Ambas tecnologías se explican también más adelante, en el punto correspondiente del documento.

Desde la OMS se establece que las instalaciones dedicadas al tratamiento del coronavirus tienen que contar con filtros HEPA tanto en impulsión como en la extracción de aire, así como en la recirculación, si la hubiese. [13] El aire de extracción no puede emplearse de

ninguna manera en otras áreas de la instalación, y las tomas de extracción tienen que dispersar el aire en el ambiente, sin direccionarlo a edificios contiguos.

Otros

Otros contaminantes a tener en cuenta que tienen que ser retenidos por los sistemas de climatización son debidos a la actividad humana (cenizas), a factores ambientales (arena) o estacionales (polen).

1.3 FACTORES DE CRECIMIENTO DE MICROORGANISMOS

Temperatura

Los intervalos de temperatura que favorecen el crecimiento de las bacterias son ligeramente distintos para cada especie, aunque todas muestran una tendencia similar; existe un máximo fuera del cual, la velocidad de crecimiento va decreciendo. [14]

El rango de crecimiento de los hongos suele estar comprendido entre 5°C y 40°C. Las bacterias crecen en entornos comprendidos entre 10 y 50°C. El valor óptimo ronda los 24°C. Una combinación adecuada de temperatura y humedad relativa puede dar resultados favorables al crecimiento incluso fuera del óptimo de temperatura.

También se observa que para el verano la concentración de microorganismos es más elevada que para el invierno. Esto es coherente con los límites establecidos anteriormente, teniendo en cuenta que la temperatura a la que se adecúa el flujo de aire de climatización está próxima a los 24°C en los que se aprecia el cambio de tendencia en bacterias.

Humedad relativa

El nivel de humedad en el aire es un factor controlable en los sistemas de climatización de forma directa (humectación) o indirecta (incremento de temperatura). Existen perturbaciones del valor deseado provenientes del interior de los locales (personas) y del exterior (condiciones ambiente). [14]

Éste es también un factor clave en la reproducción de los microorganismos en los HVAC, estando favorecido entre el 40% y el 90%, mayor en los valores más elevados del intervalo.

La Norma UNE 171330 fija un umbral de confort de HR entre el 30% y el 70%, para temperaturas de 21-23°C en otoño e invierno y 23-25°C en primavera y verano. El RITE establece unos valores más restrictivos: entre el 40% y el 50% y en verano entre el 45% y el 60%. Son valores dentro del intervalo de reproducción de microorganismos, pero no se renuncia en ningún caso a los intervalos de confort.

Polvo acumulado

Este elemento contaminante supone una reducción en el rendimiento de los equipos de ventilación. Es, además, un caldo de cultivo para los microorganismos. [15] Se ha observado que doblar la masa de polvo acumulado supone un aumento de entre el doble y el triple de éstos. El efecto aumenta para humedad elevada y velocidades bajas (mayor deposición de polvo).

El polvo presente en un elemento del sistema de climatización puede suponer una contaminación de los conductos del mismo, debido al arrastre de las partículas por la corriente de aire.

1.4 POSIBLES FUENTES DE CONTAMINACIÓN EN SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN

Existen puntos más sucios que otros dentro de los sistemas de climatización. La presencia de nutrientes (polvo) y de microorganismos, junto con condiciones buenas para su crecimiento y reproducción pueden resultar en puntos de generación de contaminantes.

Filtros

Existe una capacidad inicial de inhibir el crecimiento de los microorganismos presentes en los filtros, que está asociada a la propiedad higroscópica de éstos. Cuanta mayor capacidad de absorción de agua tenga un filtro, mayor será el tiempo en el cual los microorganismos no podrán crecer en él. Es, no obstante, un transitorio, y cuando se alcanza la saturación se anula esta capacidad por completo. [14]

Gran parte de los estudios realizados sobre los filtros muestran una dependencia concreta de la HR sobre la reproducción de microorganismos en éstos. Cuando se mantiene un nivel de humedad por debajo del 70-80% no se aprecia su proliferación, pero para un nivel mayor se puede llegar incluso a anular por completo la capacidad de retención del elemento, permitiendo el transporte de bacterias aguas abajo.

Conductos de aire

Un hecho observado en la contaminación de conductos de aire es la mayor presencia de microorganismos en los conductos de extracción frente a los de impulsión. Esto se debe a las menores exigencias de filtrado en este tipo de conductos y al mayor contenido en humedad (por la presencia humana). [16]

Cuanto mayor es la longitud de uno de estos conductos, mayor es la deposición de las partículas presentes en el aire que por ellos circula. Ésta es mayor cuanto mayor es el tamaño de partícula. Para evitar este ensuciamiento se tiene que filtrar el aire antes de hacerlo circular por el sistema. En el caso del diámetro del conducto, la deposición es menor al disminuirlo, pues aumenta la velocidad del flujo y el arrastre viscoso sobre las partículas.

El material en que están fabricados también influye en el crecimiento de microorganismos, siendo el más favorable el material aislante (lana mineral), seguido de la fibra de vidrio y finalmente, la chapa de acero.

Intercambiadores de calor (baterías de frío y calor)

Las baterías de intercambio son los equipos más críticos en el crecimiento bacteriano dentro de los sistemas de climatización. La rugosidad debida a las aletas presentes en la superficie de los tubos provoca un cierto ensuciamiento y la condensación en aquellos destinados a refrigerar el aire otorga a los microorganismos unas buenas condiciones para su reproducción. [17]

Otros equipos

Además de los equipos anteriores, también son susceptibles de contaminación los fan-coils, que constan de un ventilador y un intercambiador. Éstos suelen ser unidades terminales en los sistemas de climatización, por lo que el aire que por ellos circula no poseerá una carga tan alta de partículas. Puesto que disponen de una batería de intercambio, su problemática es similar a éstas. Existen filtros particulares, adaptados a su uso en fan-coils para atenuar o eliminar estos problemas.

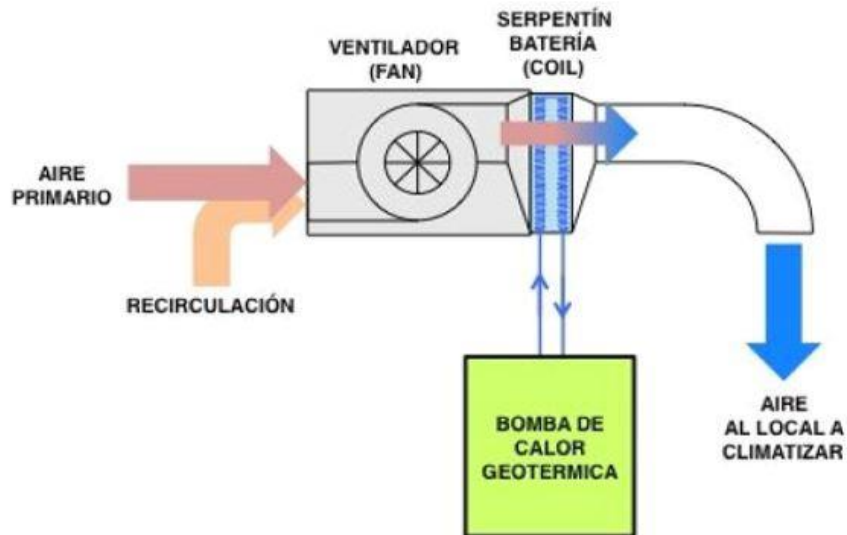


Fig. 3. Esquema de un fan-coil. Fuente: Geotermia Vertical Instalaciones. [18]

Los recuperadores de calor pueden presentar problemas de condensados y de ensuciamiento. Estos elementos permiten emplear la energía residual de la corriente de aire de extracción en la de impulsión. En algunos se pueden producir fugas entre ambas, que deberán ser reducidas y eliminadas para evitar el paso de contaminantes al aire de impulsión.

2. EQUIPO DE RETENCIÓN Y ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES

Una vez definidos los contaminantes del aire se pasa a estudiar qué equipos existen en el mercado para eliminar o retenerlos de la forma más efectiva posible.

2.1 FILTROS GENERALES

Los equipos más convencionales de los empleados dentro de los procesos de filtración de aire son los filtros mecánicos o generales. Retienen las partículas en suspensión en el aire gracias al material filtrante con el que están contruidos (algodón, material sintético, fibra de vidrio, etc). Este material está montado sobre un marco que permite su instalación en el sistema de climatización.

Además de su construcción, la forma fundamental de clasificarlos es mediante su eficiencia de retención de partículas. Ésta se define como la relación entre las partículas retenidas por el filtro y las que existían en la corriente de aire aguas arriba de éste. La norma que rige el ensayo de filtros en la actualidad es la UNE-EN ISO 16890, que los clasifica en función de su capacidad para retener partículas desde 0,3 μm hasta 1 μm , 2,5 μm y 10 μm .

Pese a que es la norma anterior la que está vigente, a la hora de comercializar filtros se mantiene todavía la nomenclatura de la norma anterior, la UNE-EN 779:2002. Esta norma divide los filtros entre gruesos (G1 a G4), medios (M5 y M6) y finos (F7 a F9), ordenados de forma creciente en función de sus eficiencias de retención. El RITE, empleado en proyectos de climatización para establecer valores de obligado cumplimiento, todavía hace uso de esta forma de clasificación.

	Clase de filtro	Detención media (%)	Eficiencia de filtración %	Minima eficiencia (IPA Treates)(%)
Filtros para polvo grueso	G1	$50 \leq A_m < 65$	-	-
	G2	$65 \leq A_m < 80$	-	-
	G3	$80 \leq A_m < 90$	-	-
	G4	$90 \leq A_m$	-	-
Filtros para polvo fino	M5	-	$40 \leq E_m < 60$	-
	M6	-	$60 \leq E_m < 80$	-
	F7	-	$80 \leq E_m < 90$	35
	F8	-	$90 \leq E_m < 95$	55
	F9	-	$95 \leq E_m$	70

Tabla 1. Clasificación de filtros según UNE-EN 779:2012. Fuente: Protechnik. [19]

La vida útil de estos equipos es reducida (6 u 8 meses). Se suelen limpiar una vez a la mitad de ésta (3 o 4 meses) y se reemplazan la segunda vez que se accede a ellos, en lugar de limpiarlos una segunda vez. Esto es así debido a su bajo precio, y a que la eficiencia de retención ya no es idéntica a la un filtro nuevo.

2.2 FILTROS ABSOLUTOS

Los filtros F9 del apartado anterior únicamente presentaban una eficiencia de retención promedio de hasta el 99%. Valores mayores se alcanzan con filtros absolutos, empleados en aplicaciones más críticas. La norma que permite ensayarlos y clasificarlos es la UNE-EN 1822:2011.

Estos filtros presentan valores de penetración de partículas extremadamente reducidos, por lo que se emplean en hospitales y aplicaciones donde es necesaria la ausencia de materia en suspensión.

FILTER CLASS	INTEGRAL VALUE		LOCAL VALUE	
	EFFICIENCY %	PENETRATION %	EFFICIENCY %	PENETRATION %
E10	≥ 85	≤ 15	–	–
E11	≥ 95	≤ 5	–	–
E12	$\geq 99,5$	$\leq 0,5$	–	–
H13	$\geq 99,95$	$\leq 0,05$	$\geq 99,75$	$\leq 0,25$
H14	$\geq 99,995$	$\leq 0,005$	$\geq 99,975$	$\leq 0,025$
U15	$\geq 99,9995$	$\leq 0,0005$	$\geq 99,9975$	$\leq 0,0025$
U16	$\geq 99,99995$	$\leq 0,00005$	$\geq 99,99975$	$\leq 0,00025$
U17	$\geq 99,999995$	$\leq 0,000005$	$\geq 99,99999$	$\leq 0,0001$

Tabla 2. Valores característicos de filtros absolutos. Fuente: General Filter. [20]

Las curvas de retención de filtros convencionales y absolutos presentan formas similares, con un mínimo en torno a un valor situado en el intervalo definido por $0,2 \mu\text{m}$ y $0,4 \mu\text{m}$ (el valor de esta eficacia mínima será mucho menor en filtros convencionales, evidentemente). Este valor se conoce como tamaño de partícula más penetrante (MPPS, o Most Penetrating Particle Size), y define las partículas que mayor dificultad encuentran para ser retenidas por los filtros.

En un proceso de filtrado conviven 3 efectos fundamentales: el impacto, la intercepción y la difusión. El impacto afecta a las partículas grandes ($>0,2 \mu\text{m}$). La intercepción, que consiste en la adherencia de la partícula en la fibra del filtro, también afecta a estas partículas grandes. La difusión afecta a las partículas más pequeñas ($<0,2 \mu\text{m}$), que fuertemente afectadas por fuerzas no paralelas al flujo de aire, se mueven erráticas por el mismo, resultando en un choque con el medio filtrante y su retención.

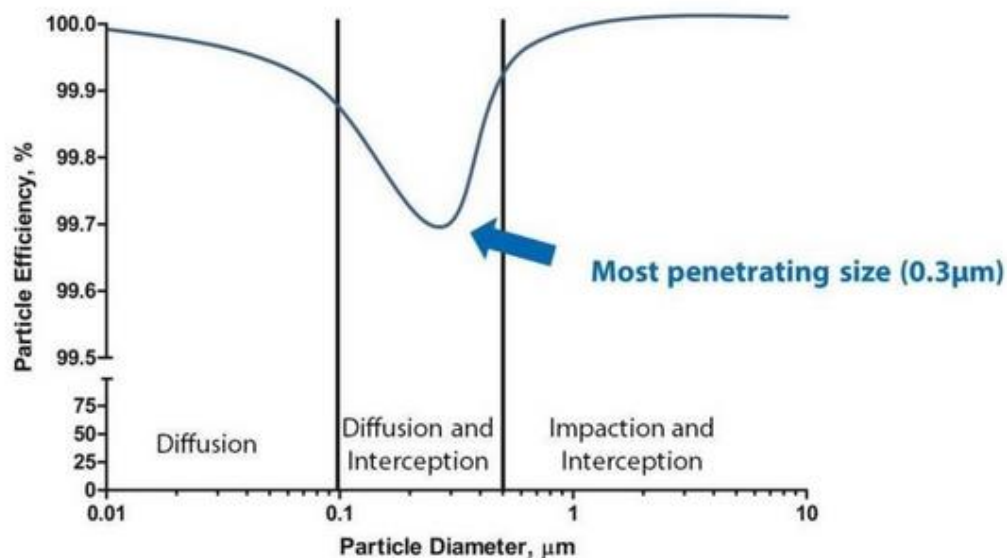


Fig. 4. Curva de eficacia de retención típica de un filtro absoluto. Fuente: Smart Air Filters. [21]

Esta circunstancia no importa demasiado en los filtros generales, pues su función fundamental consiste en limpiar el aire de las partículas más gruesas. En los filtros absolutos es mucho más crítica, pues interesa que no los atraviese casi ninguna partícula, para todos los tamaños.

La vida útil de estos equipos es mayor, aproximadamente un año o año y medio. Suelen limpiarse unas 5 o 6 veces antes de reemplazarlos ya que son elementos más caros que los filtros convencionales.

2.3 FILTROS ELECTROSTÁTICOS

Estos equipos se basan en la creación de campos eléctricos (corona, que envuelve un electrodo) para conducir partículas cargadas a una superficie, reuniéndolas posteriormente (mediante golpeteo o arrastre con un líquido) y separándolas así de la corriente gaseosa que por ellos circula.

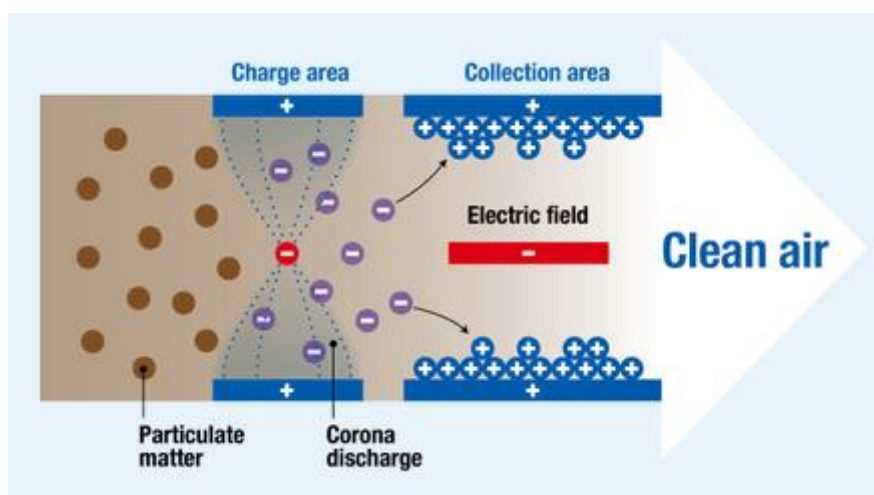


Fig. 5. Principio de funcionamiento de los filtros electrostáticos. Fuente: Fuji Electric. [22]

Hacen uso de grandes voltajes (miles de V), y en la generación de iones negativos en la corona eléctrica puede aparecer O_3 .

Las partículas más grandes absorben más iones negativos que las más pequeñas, su fuerza eléctrica en el campo es mayor y son más fácilmente separables. Además, existe una ineficiencia asociada al golpeteo, ya que éste impulsa una pequeña parte (~12%) de vuelta al flujo de gas. Este golpeteo también puede generar ondas sonoras a través del aire y del material de los conductos del sistema de ventilación. Los filtros electrostáticos más actuales empleados en ventilación general requieren de la eliminación del polvo recogido en los colectores en su mantenimiento, no durante su operación, por lo que se eliminan estos problemas.

El gran interés de estos filtros radica en las pérdidas de carga reducidas frente a alternativas convencionales con su misma capacidad de retención.

2.4 ADSORCIÓN DE GASES

La adsorción es un proceso físico o químico, en el cual se ven involucrados un adsorbato y un adsorbente. [23] En el caso de climatización por aire, el primero será un gas a ser eliminado del aire y el segundo un sólido encargado de eliminar al primero.

Adsorbato y adsorbente poseen cierta afinidad, que llevan al adsorbato a quedar adherido por fuerzas Van der Waals al adsorbente en el caso de un proceso físico o a formar un nuevo compuesto en el caso de un proceso químico.

En el momento en que el adsorbente se ha agotado es necesario cambiarlo para que pueda seguir realizando su función. Este tiempo de vida depende de la concentración de contaminante en el aire, y se manejan valores de varios meses a un año.

Existen distintos materiales empleados como adsorbentes. El más extendido es el carbón activado, por su uso para eliminar COVs, humo de tabaco y olores. También existen soluciones basadas en alúmina activada, gel de sílice, zeolitas y polímeros sintéticos.

A la hora de seleccionar uno u otro se acude a los catálogos de los fabricantes y se selecciona el producto más adecuado al contaminante que se desea eliminar.

2.5 FOTOCATÁLISIS Y DESINFECCIÓN UV

Los fotocatalizadores son materiales semiconductores. Como tales, poseen en su espectro energético una banda prohibida en la cual no pueden encontrarse los electrones. Dependiendo de la anchura de este gap, existirá una longitud de onda determinada que podrá excitar a los electrones para pasar de la banda de valencia (menor energía) a la de conducción (mayor energía). Longitudes mayores a estos valores dispondrán de una energía demasiado pequeña como para producir el salto electrónico. [24]

Para estos compuestos, las longitudes de onda máximas están por debajo del espectro visible en su mayor parte. Por eso es necesario recurrir a luz ultravioleta para poder desencadenar este fenómeno. Cuando esta luz incide sobre el material, se liberan radicales libres (iones) que son capaces de matar los microorganismos de la corriente de aire.

Semiconductor		E. gap (eV)	L. onda (nm)
Reduct.	CdTe	1,4	886,22
	CdSe	1,7	729,83
	Si	1,1	1127,92
RedOx	CdS	2,4	516,96
	SrTiO3	3,2	387,72
	TiO2	3,2	387,72
	ZnO	3,2	387,72
	Nb2O5	3,4	364,91
Oxidativos	MoS2	1,75	708,98
	Fe2O3	2,3	539,44
	WO3	2,8	443,11
	SnO2	3,5	354,49

Tabla 3. Materiales fotocatalíticos típicos. Fuente: elaboración propia.

De todos los materiales enumerados, es el TiO₂ el más ampliamente empleado en soluciones de fotocátalisis. Muchos de ellos son comunes en la superficie terrestre.

Como se ha comentado, es la radiación UV la que puede activar la fotocátalisis. Es necesario por ello seleccionar lámparas que trabajen en este espectro, pues la luz natural apenas contiene longitudes de onda aprovechables. La atmósfera terrestre se encarga de filtrar las longitudes de onda más cortas y el espectro útil para fotocátalisis de la luz incidente en la superficie resulta bastante mermado.

Ejemplos de tecnologías aprovechables son las lámparas de vapor de mercurio (espectro disperso, pero buena vida útil), xenón (espectro muy disperso), lámparas UV-C (espectro concentrado pero pueden generar ozono), etc.

Un aspecto importante a la hora de seleccionar una solución de fotocátalisis es asegurarse de que no se va a producir ozono. El trabajar con longitudes de onda tan energéticas puede traer este efecto secundario no deseado.

Es posible emplear lámparas UV sin la presencia de un fotocatalizador. Debido a que la atmósfera terrestre filtra parte del espectro UV-A (320 a 400 nm), gran parte del UV-B (280 a 320 nm) y todo el UV-C (200 a 280 nm), la emisión de luz en el último de los 3 genera un ataque ante el cual los microorganismos no pueden defenderse. El valor óptimo se sitúa en 254 nm.

Hay que tener gran cuidado a la hora de manejar este tipo de dispositivos, y no emplearlos cerca de unidades terminales, pues este tipo de luz resulta tan dañina para el ser humano como para los microorganismos.

2.6 OZONIZACIÓN

Esta técnica consiste en la generación e inyección de ozono en sistemas de ventilación para su desinfección. Una gran parte de las bacterias y hongos presentes en estos sistemas son vulnerables ante su gran carácter oxidante.

Es esta característica oxidante también su gran inconveniente, pues el ozono constituye un contaminante en las capas bajas de la atmósfera. En el aire interior ya se ha visto en el

punto 2 cómo está limitada su concentración para evitarla aparición de problemas de salud en personas que ocupen espacios donde esté presente este gas.

Distintas agencias gubernamentales y también la propia ASHRAE recomiendan precaución a la hora de emplear el ozono como desinfectante en sistemas de climatización. Reconocen que no se han realizado suficientes estudios en torno a este tema, y que el uso de concentraciones de seguridad puede resultar poco efectivo (incluso inocuas) frente a los contaminantes tratados. [\[25\]](#)

Fuera de los sistemas de climatización, el ozono se emplea como desinfectante en quirófanos, vehículos, etc. Durante su aplicación es necesaria la utilización de EPIs en el caso de que sea una o varias personas quienes realicen el trabajo, o bien no tiene que haber nadie en la estancia en el caso de que sea un equipo autónomo el encargado de llevarlo a cabo.

3. CÁLCULOS ENERGÉTICOS Y ECONÓMICOS

El último objetivo a analizar en el proyecto es el impacto energético que supondría la implementación de las tecnologías anteriores en sistemas de climatización. Para ello se definen varios casos a calcular para compararlos y llegar a conclusiones. El cálculo de estos casos se realizará mediante el software AirCalc, y será a los equipos resultantes a los que se aplicarán los cálculos que se explican a continuación, de interés para el proyecto.

Existen muchas soluciones a la hora de climatizar un espacio o edificio. Dependiendo de las necesidades y el tamaño de dichos espacios, se tendrán sistemas más complejos o menos. Estos sistemas pueden estar basados en aire, agua o electricidad. El presente proyecto se ocupa de las primeras.

Los sistemas de climatización por aire disponen de dos corrientes fundamentales: impulsión (el aire procedente del exterior que se climatiza y se hace circular al interior de las estancias) y extracción (el aire que se extrae del interior de las estancias y se expulsa al exterior).

En grandes sistemas de climatización por aire, que es la referencia que se toma en este proyecto, los primeros equipos que encuentra el aire de impulsión son las climatizadoras, o UTAs (Unidades de Tratamiento de Aire).

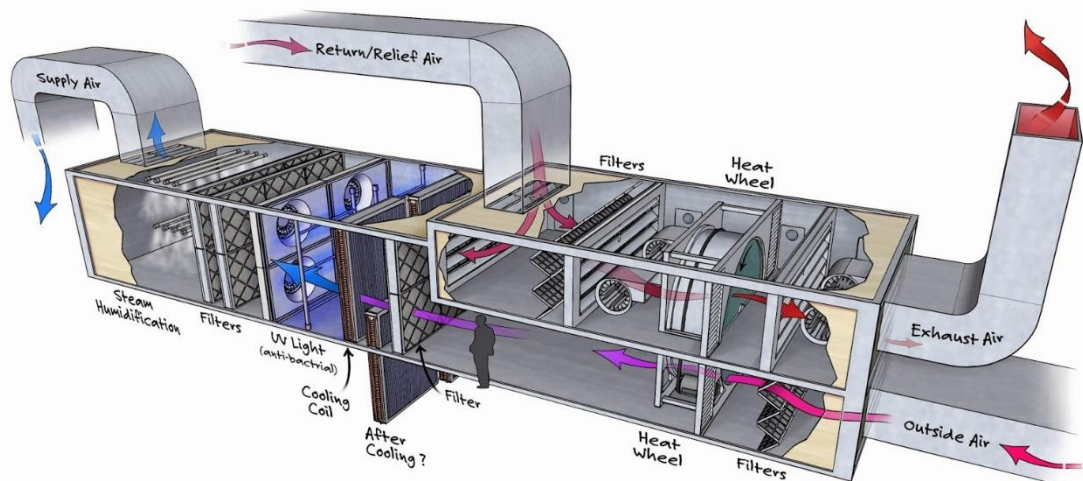


Fig. 6. Ilustración de una climatizadora. Fuente: Aire Puro. [26]

Éstas son equipos capaces de hacer circular ambas corrientes de aire, adaptándolas a unos estándares de calidad de aire en interiores (temperatura, humedad, ausencia de partículas, etc.) y recuperando la energía aprovechable existente de la corriente de extracción. Los caudales de aire necesarios

Están diseñadas de forma modular, donde cada bloque representa una función dentro del conjunto. Parte de los bloques son los filtros y otros equipos que han sido vistos en el punto anterior. Una correcta elección de estos componentes dará como resultado equipos energéticamente más eficientes que otros.

La eficiencia energética de las climatizadoras se expresa en una etiqueta que las califica desde E hasta A+, en orden creciente de eficiencia. Los cálculos que permiten obtenerla

fueron definidos por Eurovent en un documento de referencia. [27] A continuación se da una idea de cómo se llevan a cabo, viéndose las fórmulas en detalle en el Anexo A.

3.1 CÁLCULOS DE ETIQUETA ENERGÉTICA DE CLIMATIZADORAS

Existen calificaciones energéticas para dos diseños: de invierno y de verano. En el primer caso estos equipos funcionan en modo calentamiento (o calor) y en el segundo en modo enfriamiento (o frío). En este proyecto se trabaja con la de invierno, pues los parámetros de relevancia del proyecto (relacionados con la filtración) tienen la misma influencia en ambos diseños, contemplando el de verano más variables no relacionadas con filtración y desinfección.

El objetivo de estos cálculos es la obtención de la categoría energética de las climatizadoras. El flujo de cálculos es el que se observa en la imagen y se explica brevemente a continuación:

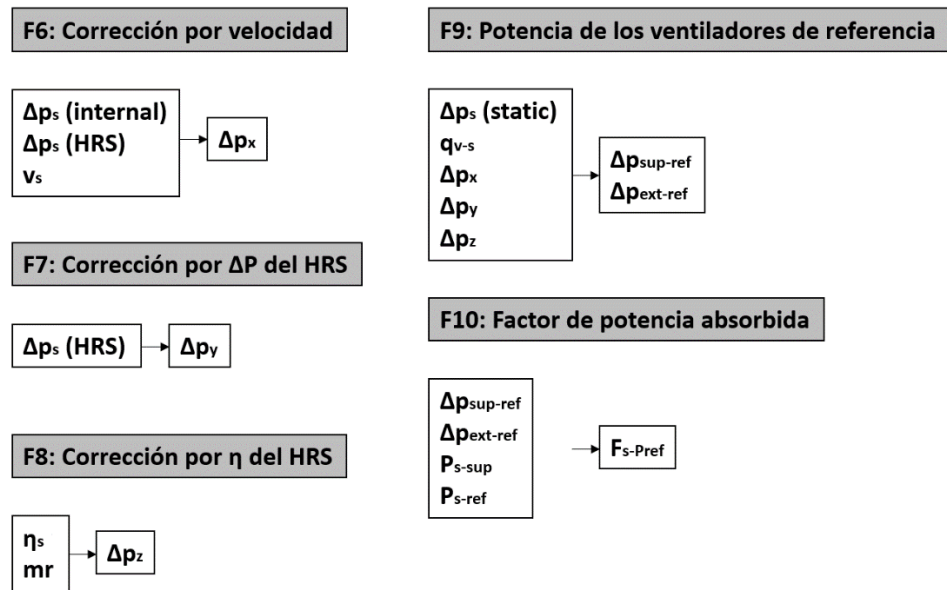


Fig. 7. Cálculos de etiqueta energética de climatizadoras. Fuente: elaboración propia.

El primer paso en esta metodología es el cálculo de tres correcciones de la presión estática de trabajo de las climatizadoras (Δp_x , Δp_y y Δp_z). Estas correcciones existen debido a que las condiciones de trabajo de las UTAs reales son distintas a las de referencia, definidas por Eurovent.

La primera corrección se debe a la velocidad del aire por el equipo (v_s) y hace uso además de la presión estática de la climatizadora ($\Delta p_{s-internal}$) y de las pérdidas en el recuperador de calor (Δp_{s-HRS}). La segunda corrección se debe únicamente a las pérdidas en el recuperador. La tercera está relacionada con el rendimiento del recuperador de calor (η_s), y depende además de la relación de mezcla entre aire exterior y recirculado (mr , o mixing ratio). Unas correcciones de presión estática positivas significarán que la climatizadora real exige una caída de presión mayor que la teórica de Eurovent.

Estas correcciones de la presión estática entran en juego en el cálculo de las potencias de referencia de los ventiladores de impulsión y extracción del equipo de Eurovent ($P_{sup-ref}$ y $P_{ext-ref}$).

Finalmente, estas potencias se emplean junto a las de sus contrapartes reales (P_{s-sup} y P_{s-ext}) en el cálculo del parámetro conocido como factor de potencia absorbida (f_{s-Pref}).

Cuanto mayor sea este factor, menor eficiencia energética posee la climatizadora estudiada.

Los cálculos se inician asumiendo que la eficiencia energética es la mejor (A+). Si el factor de potencia absorbida es mayor a 1 es necesario recalcularlo para la categoría inmediatamente inferior, hasta obtener un valor inferior a la unidad (momento en el cual el equipo real consume menos que el de referencia de Eurovent).

El detalle de las fórmulas se encuentra, como se ha comentado anteriormente, en el Anexo A. Los resultados de los cálculos de la etiqueta energética se pueden consultar en detalle en el Anexo D.

3.2 CÁLCULOS DE COSTES DE ELEMENTOS DE FILTRADO

A continuación se describen brevemente los cálculos realizados para obtener pérdidas y costes de operación e implementación de los distintos equipos de filtrado y desinfección empleados en las climatizadoras calculadas. Estos cálculos no responden a la metodología de una norma concreta.

Se comienza definiendo el VAN de cada una de las tecnologías de filtrado, como suma de 3 términos: el coste de adquisición, el de consumo eléctrico del equipo y el de consumo del ventilador por pérdidas en el elemento de filtrado:

$$VAN_{tecn} = I_{0,tecn} + CE_{tecn} + CP_{tecn} \quad (1)$$

Puesto que la vida útil de los distintos equipos no es la misma, se calcula el coste de mantener en el tiempo infinitos reemplazos para que el sistema de climatización funcione de forma indefinida. Así se puede comparar realmente el coste total. Para una tasa de actualización i :

$$VAN_{tecnPerp} = \frac{VAN_{tecn}}{1 - \frac{1}{(1+i)^{vida\ útil}}} \quad (2)$$

De los dos términos de costes variables de (6), el de la energía eléctrica consumida por el equipo durante su funcionamiento resulta:

$$CE_{tecn} = \sum_{n=1}^{vida\ útil} \frac{\dot{W}_{equipo} \cdot t_{func.} \cdot C_{elect.}}{1000 \cdot (1+i)^n} \quad (3)$$

$$CE_{tecn} = \frac{C_{elect.}}{1000} \cdot \dot{W}_{equipo} \cdot t_{func.} \cdot \sum_{n=1}^{vida\ útil} \frac{1}{(1+i)^n} \quad (4)$$

, donde:

CE_{tecn} son los costes en electricidad del equipo durante su vida útil, en euros.

C_{elect} es el coste de la electricidad de referencia, en €/kWh.

\dot{W}_{equipo} es la potencia del equipo, en W.

t_{func} es el tiempo de funcionamiento anual del equipo, en horas.

Y el término de consumo del ventilador para vencer pérdidas tiene una expresión muy similar:

$$CP_{tecn} = \sum_{n=1}^{vida\ útil} \frac{CP_{tecn,Año}}{(1+i)^n} = \sum_{n=1}^{vida\ útil} \frac{\dot{W}_{pérdidas} \cdot t_{func.} \cdot C_{elect.}}{1000 \cdot (1+i)^n} \quad (5)$$

$$P_{\text{tecn}} = \frac{C_{\text{elect.}}}{1000} \cdot (k_{\text{veces}} \cdot W_{\text{pérdidas}}) \cdot \sum_{n=1}^{\text{vida útil}} \frac{1}{(1+i)^n} \quad (6)$$

, donde:

CP_{tecn} es el coste de vencer las pérdidas del filtro durante su vida útil, en euros

C_{elect} es el coste de la electricidad de referencia, en €/kWh

k_{veces} es el número de paradas de mantenimiento realizadas en un año.

W_{pérdidas} es la energía de pérdidas del equipo entre dos paradas de mantenimiento, en Wh.

El único término no definido en las ecuaciones anteriores se encuentra en (10) y (11), siendo éste la energía de pérdidas entre dos paradas de mantenimiento. Esta energía tiene en cuenta la evolución del ensuciamiento en el filtro a lo largo del tiempo. Se parte para su cálculo de una fórmula de consumo de energía de filtros dada por Eurovent [28] (con la caída de presión promediada) y se expresa en forma integral:

$$W = \frac{q_v \cdot \overline{\Delta p} \cdot t}{1000 \cdot \eta} \quad (7)$$

$$W_{\text{pérdidas}}(t_{\text{ens}}) = \int_0^{t_{\text{ens}}} \frac{q_v(t) \cdot \Delta p(t)}{\eta(t)} dt \quad (8)$$

, donde:

W_{pérdidas} es la energía de pérdidas del equipo entre dos paradas de mantenimiento, en Wh.

t_{ens} es el tiempo transcurrido entre dos mantenimientos consecutivos, en horas.

q_v(t) es el caudal de aire que circula por el filtro, en m³/h.

Δp(t) es la caída de presión en el filtro, en Pa.

η(t) es el rendimiento del ventilador, en tanto por uno.

Se maneja una caída de presión constante para los elementos con pérdida de carga muy pequeña y una exponencial para el resto. Los filtros H13 se ajustan mejor a un incremento lineal. Estos modelos de la evolución de la pérdida de carga pueden consultarse en el Anexo A.

Para realizar los cálculos se han considerado los valores de 3.000 horas de funcionamiento anuales (unas 8 horas diarias), un precio de la electricidad de referencia de 0,119 €/kWh, paradas de mantenimiento trimestrales y una tasa de actualización del 3,8% (promedio para el IPC español desde el año 68).

Los resultados numéricos de los cálculos económicos se pueden consultar en el Anexo C.

un IDA 2, de acuerdo con lo establecido por el RITE, este equipo está diseñado para climatizar un edificio ocupado por 177 personas.

Se dispone además de un intercambiador rotativo que permitirá recuperar la energía útil del retorno del sistema de climatización. También existe una batería de intercambio en impulsión.

El fabricante de los módulos de filtrado es Camfil y los modelos, el ECOPLEAT-M6-98 y el OPACKFIL-F8-296.

4.2 INCREMENTO DE CAUDAL (CASO 2)

Este segundo caso posee las mismas especificaciones que el anterior, con la salvedad de que ahora el caudal tanto en impulsión como en retorno es de 11.000 m³/h, suficiente para climatizar un edificio de 244 personas. Este cambio está orientado a ver cómo influye un aumento de caudal (y de velocidad de referencia, en este caso) en la clase energética y en las distintas variables del cálculo. No se incluye el detalle del esquema, al ser el mismo que el anterior.

		CASO 1		CASO 2	
		Impulsión	Retorno	Impulsión	Retorno
Caudal de aire	(m³/h)	8.000	8.000	11.000	11.000
Presión estática total	(Pa)	673	469	804	539
Presión estática interna	(Pa)	373	219	504	289
Consumo de Pot. activa	(kW)	2,32	1,61	3,77	2,57
Consumo anual	(€)	1.403,01		2.263,38	
Velocidad de referencia	(m/s)	1,3	1,41	1,78	1,94

Tabla 4. Climatizadoras de casos 1 y 2. Fuente: elaboración propia.

Se puede observar que un aumento de caudal en la climatizadora provoca un aumento de las pérdidas en general (y en los filtros en particular), en la potencia consumida en los ventiladores y en la velocidad de referencia del aire.

		$\Delta p_i / \Delta p_r$ (Pa)	Consumo anual		Pérdidas anuales	
			kWh	€	kWh	€
FILTRO M6	Caso 1	49 / 147	-	-	748,06	89,02
	Caso 2	69 / 169	-	-	1.624,29	191,38
FILTRO F8	Caso 1	58 / 158	-	-	1.055,93	124,41
	Caso 2	85 / 185	-	-	1.870,92	220,44

Tabla 5. Filtros de casos 1 y 2. Fuente: elaboración propia.

En el caso de los filtros en particular, se puede observar que también aumenta su pérdida de carga, lo que se traduce en unos consumos mayores para estos equipos.

CLASE A+		Δp_x	Δp_y	Δp_z	$P_{airsRef}$	f_{sPref}
CASO 1	Impulsión	-28,1	-134	40,2	3,0177	0,76
	Retorno	1	-129	40,2	2,1696	
CASO 2	Impulsión	97,4	-87	86,5	3,6380	1,02
	Retorno	43,6	-80	86,5	2,5833	

Tabla 6. Parámetros de clase energética de casos 1 y 2 (clase A+). Fuente: elaboración propia.

Aumentar el caudal provoca un aumento de la presión estática, lo que incrementa el valor de la potencia del ventilador de referencia (P_{airsRef}). El propio aumento del caudal acentúa este hecho, pues entra multiplicando en la fórmula (4) del cálculo. El aumento de las correcciones debería provocar una modificación de P_{airsRef} en sentido contrario, pero se ve ensombrecido por los otros dos parámetros.

El factor de potencia absorbida debería reducirse al aumentar P_{airsRef} , pero aumenta, al incrementarse la potencia real consumida en impulsión y en retorno. Con ello se provoca una fuerte merma en la categoría energética de la climatizadora, llegando en este caso a reducirla de A+ a A. Los valores de ésta son los que aparecen en la siguiente tabla, donde se ve que se mantienen las tendencias:

CLASE A		Δp_x	Δp_y	Δp_z	P_{airsRef}	f_{sPref}
CASO 1	Impulsión	-86,7	-114	-10,1	3,4377	0,67
	Retorno	-19	-109	-10,1	2,4288	
CASO 2	Impulsión	47,3	-67	36,2	4,1495	0,90
	Retorno	28,1	-60	36,2	2,8992	

Tabla 7. Parámetros de clase energética de casos 1 y 2 (clase A). Fuente: elaboración propia.

4.3 DISMINUCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA, VELOCIDAD ALTA (CASO 3)

En este tercer caso se parte de la climatizadora anterior, variando las exigencias de filtrado de un ODA 3 e IDA 2 a un ODA 2 e IDA 2. De esta forma se elimina el filtro M6 en impulsión, resultando en menores pérdidas de carga en el sistema para observar su efecto sobre la categoría energética.

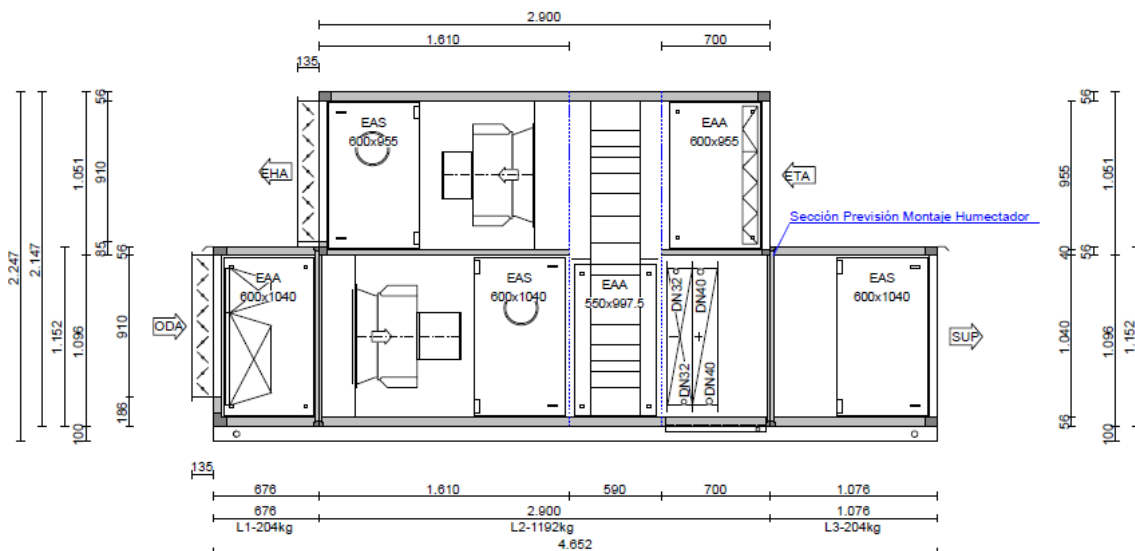


Fig. 9. Climatizadora de casos 3 y 4. Fuente: elaboración propia.

		CASO 2		CASO 3	
		Impulsión	Retorno	Impulsión	Retorno
Caudal de aire	(m ³ /h)	11.000	11.000	11.000	11.000
Presión estática total	(Pa)	804	539	685	539
Presión estática interna	(Pa)	504	289	385	289
Consumo de Pot. activa	(kW)	3,77	2,57	3,23	2,57
Consumo anual	(€)	2.263,38		2.070,60	
Velocidad de referencia	(m/s)	1,78	1,94	1,78	1,94

Tabla 8. Climatizadoras de casos 2 y 3. Fuente: elaboración propia.

La disminución de las pérdidas de carga influye sobre el consumo del ventilador, reduciéndolo.

	$\Delta p_i / \Delta p_f$ (Pa)	Consumo anual		Pérdidas anuales	
		kWh	€	kWh	€
FILTRO M6, caso 2	69 / 169	-	-	1.624,29	191,38

Tabla 9. Filtro eliminado en el caso 3. Fuente: elaboración propia.

La diferencia de costes de operación entre ambas climatizadoras no es igual al coste del filtro eliminado. Esto es así debido a que el cálculo de climatizadoras se realiza con los valores de presión promedio, mientras que en los cálculos económicos se ha simulado una evolución exponencial entre presión inicial y final. Pese a todo, la diferencia entre ambos criterios es menor al 1%.

CLASE A+		Δp_x	Δp_y	Δp_z	P_{airsRef}	f_{sPref}
CASO 2	Impulsión	97,4	-87	86,5	3,6380	1,02
	Retorno	43,6	-80	86,5	2,5833	
CASO 3	Impulsión	63,4	-87	86,5	3,2302	1,00
	Retorno	43,6	-80	86,5	2,5833	

Tabla 10. Parámetros de clase energética de casos 2 y 3. Fuente: elaboración propia.

Al disponer de menos pérdidas en el interior de la climatizadora la corrección Δp_x disminuye de forma acorde. Esto debería provocar un aumento en la potencia de referencia, que sin embargo disminuye.

Esto se debe a que la presión estática total del sistema de climatización disminuye también, y acaba imponiéndose en el consumo de referencia. Nuevamente, el factor de potencia absorbida disminuye, cuando debería aumentar, pues los consumos reales también están disminuyendo.

Por tanto, la tendencia que se impone en un equipo real es que cuanto más se reduzcan las pérdidas de carga en la climatizadora, mejor será su calificación energética.

4.4 DISMINUCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA, VELOCIDAD REDUCIDA (CASO 4)

Este equipo es el mismo que en el caso anterior, pero para un caudal de 8.000 m³/h. Es de interés tratarlo, pues si la velocidad es menor que la de referencia impuesta por la norma algunas tendencias se podrían invertir.

La comparación entre el caso 1 y éste supone reducir las exigencias de filtrado (menor pérdida de carga) para un caudal reducido (velocidad menor).

		CASO 1		CASO 4	
		Impulsión	Retorno	Impulsión	Retorno
Caudal de aire	(m ³ /h)	8.000	8.000	8.000	8.000
Presión estática total	(Pa)	673	469	575	469
Presión estática interna	(Pa)	373	219	275	219
Consumo de Pot. activa	(kW)	2,32	1,61	2,00	1,61
Consumo anual	(€)	1.403,01		1.288,77	
Velocidad de referencia	(m/s)	1,3	1,41	1,3	1,41

Tabla 11. Climatizadoras de casos 1 y 4. Fuente: elaboración propia.

Se mantienen las mismas tendencias que con los casos equivalentes de caudal elevado, reduciéndose el consumo al disminuir pérdidas.

CLASE A+		Δp_x	Δp_y	Δp_z	$P_{airsRef}$	f_{sPref}
CASO 1	Impulsión	-28,1	-134	40,2	3,0177	0,76
	Retorno	1	-129	40,2	2,1696	
CASO 4	Impulsión	-17,4	-134	40,2	2,633	0,75
	Retorno	1	-129	40,2	2,1696	

Tabla 12. Parámetros de clase energética de casos 1 y 4. Fuente: elaboración propia.

La única diferencia en las tendencias con respecto al caso anterior (velocidad elevada) se refleja en la corrección de presión estática por velocidad. Al ser inferior a cero, el equipo de estudio está trabajando a una presión estática inferior a la esperada, y disminuir las pérdidas sin modificar la velocidad lo aproxima más a dicha situación, por lo que la corrección disminuye en valor absoluto (se acerca a cero).

En el caso anterior (caso 3) también disminuía en valor absoluto, acercándose a cero desde la mitad positiva del eje real. En el resto de variables prima, no obstante, la reducción de presión estática total, manteniéndose inalteradas sus tendencias.

4.5 CLIMATIZADORA PARA HOSPITAL, LOCALES DE CLASE II (CASO 5)

Sobre la climatizadora inicial se realizan varias modificaciones para adaptar el equipo a su uso en un hospital. Para ello, se sustituye el intercambiador rotativo por uno de flujo cruzado, para eliminar las fugas entre ambas corrientes.

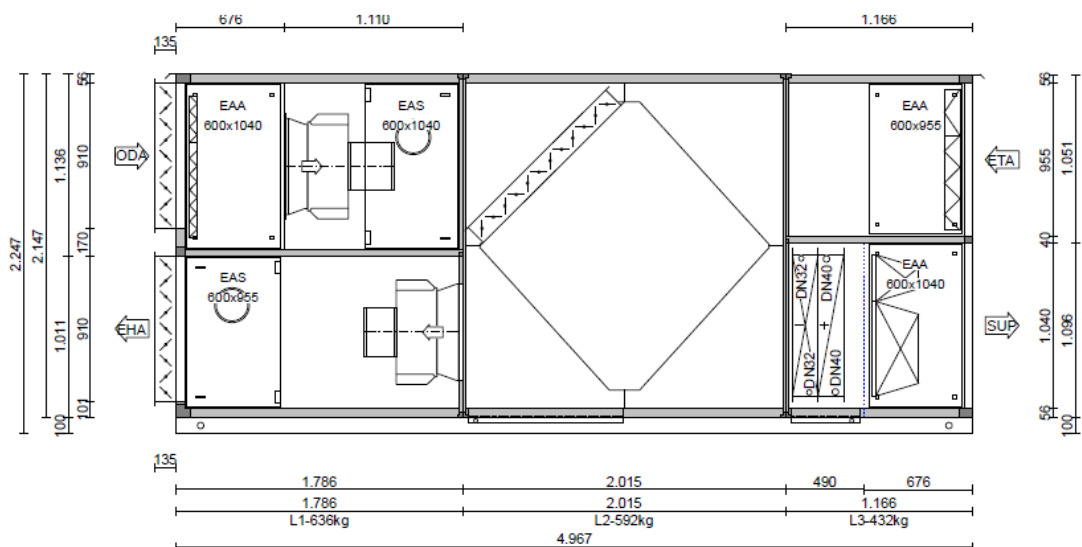


Fig. 10. Climatizadora de casos 5, 6, 7 y 8. Fuente: elaboración propia.

Además, la normativa de hospitales para el local indicado exige el uso de dos niveles de filtración en impulsión: un M5 y un F9. Se mantiene el M6 en retorno. Esta modificación conforma un segundo caso base sobre el que realizar modificaciones.

Los modelos de los nuevos filtros son el ECOPLEAT-M5-48 y el OPACKFIL-F9-296, ambos de Camfil.

	$\Delta p_i/\Delta p_r$ (Pa)	Consumo anual		Pérdidas anuales	
		kWh	€	kWh	€
FILTRO M5	42 / 126	-	-	641,20	76,30
FILTRO M6	49 / 147	-	-	748,06	89,02
FILTRO F9	83 / 183	-	-	1.338,40	159,27

Tabla 13. Filtros de caso 5. Fuente: elaboración propia.

4.6 CLIMATIZADORA PARA HOSPITAL, LOCALES DE CLASE I (CASO 6)

Esta climatizadora es idéntica a la anterior en lo que a sus componentes se refiere. La diferencia radica en la presión externa que tienen que vencer los ventiladores del equipo. Se supone que el aire climatizado por el equipo se divide en 8 corrientes de 1.000 m³/h, destinados a 8 estancias iguales.

El objeto de esto es aumentar la caída de presión externa tanto en impulsión como en extracción del equipo para estudiar su influencia en la clase energética. El hecho de tener locales de clase I (más críticos dentro del hospital) exige el uso de filtros H13, que conforman un tercer nivel de filtrado. Se recomienda en normativa que se encuentren lo más cerca posible de las unidades terminales/rejillas de impulsión.

Los filtros absolutos empleados en el proyecto son modelos VEXL-H13-292, de Camfil.

	CASO 5		CASO 6	
	Impulsión	Retorno	Impulsión	Retorno
Caudal de aire (m ³ /h)	8.000	8.000	8.000	8.000
Presión estática total (Pa)	706	490	1.074	858
Presión estática interna (Pa)	406	240	406	240
Consumo de Pot. activa (kW)	2,43	1,66	3,79	2,95
Consumo anual (€)	1.460,13		2.406,13	
Velocidad de referencia (m/s)	1,4	1,53	1,4	1,56

Tabla 14. Climatizadoras de casos 5 y 6. Fuente: elaboración propia.

El aumento de la presión estática total aumenta el consumo de potencia activa en los ventiladores.

	$\Delta p_i/\Delta p_r$ (Pa)	Consumo anual		Pérdidas anuales	
		kWh	€	kWh	€
FILTRO H13	136 / 600	-	-	486,77	57,93

Tabla 15. Filtro añadido en el caso 6. Fuente: elaboración propia.

Las pérdidas anuales del filtro anterior se refieren a uno de los filtros. Se tienen 8 en impulsión (1 por cada rama) y otros 8 en retorno.

CLASE A+		Δp_x	Δp_y	Δp_z	P_{airsRef}	f_{sPref}
CASO 5	Impulsión	0	-112	100,5	2,7442	0,88
	Retorno	11,5	-108	100,5	1,9129	
CASO 6	Impulsión	0	-112	100,5	4,0301	0,93
	Retorno	11,5	-108	100,5	3,2253	

Tabla 16. Parámetros de clase energética de casos 5 y 6. Fuente: elaboración propia.

A diferencia de la comparación anterior, en ésta se ha modificado únicamente la presión externa de la climatizadora. Incrementar las pérdidas se ha traducido en un aumento de la potencia de referencia de ésta. Nuevamente, si el factor de potencia absorbida debería reducirse, es el incremento de la potencia real el que invierte esta tendencia, prevaleciendo sobre la anterior y empeorando la calificación energética del equipo.

Como dentro de la climatizadora no se ha modificado ningún parámetro, las correcciones a la presión estática no han variado.

4.7 CLIMATIZADORA DE HOSPITAL CON DESINFECCIÓN UV (CASO 7)

En este caso se añaden al equipo anterior lámparas de desinfección UV, irradiando sobre la batería de intercambiadores. Al ser uno de los puntos más húmedos del equipo, es susceptible de contaminación biológica y de convertirse en generador de contaminación para el resto del sistema.

De cara a elegir el número de equipos a emplear, cabe destacar que ASHRAE recomienda el uso de una potencia irradiada sobre la superficie de los intercambiadores de unos 50 a 100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, por lo que se elegirá el valor mayor para dimensionar el sistema. [33] La caída de presión de estos elementos es despreciable.

En el equipo existe una batería doble: una para frío y otra para calor, que poseen áreas de intercambio de 41,09 m² y 63,59 m², respectivamente. El equipo susceptible de contaminación es el primero, ya que es sobre el que se producen condensados y en él se reproducirán los microorganismos. El número necesario de lámparas es 11 para el total del área de intercambio, para los modelos elegidos, de 5W de potencia irradiada y 16W de consumo cada una. Los modelos son Osram PURITEC HNS 16 W G5.

		CASO 6		CASO 7	
		Impulsión	Retorno	Impulsión	Retorno
Caudal de aire	(m ³ /h)	8.000	8.000	8.000	8.000
Presión estática total	(Pa)	1.074	858	1.074	858
Presión estática interna	(Pa)	406	240	406	240
Consumo de Pot. activa	(kW)	3,790	2,950	3,996	2,950
Consumo anual	(€)	2.406,13		2.479,72	
Velocidad de referencia	(m/s)	1,4	1,53	1,4	1,56

Tabla 17. Climatizadoras de casos 6 y 7. Fuente: elaboración propia.

La adición de estos equipos únicamente influye en la potencia consumida en la rama de impulsión, al considerar despreciable su pérdida de carga.

	$\Delta p_i/\Delta p_r$ (Pa)	Consumo anual		Pérdidas anuales	
		kWh	€	kWh	€
LÁMPARA UV	-	48,00	5,71	-	-

Tabla 18. Datos de una lámpara UV, de las añadidas en el caso 7. Fuente: elaboración propia.

El consumo de estas lámparas es muy reducido, y sus pérdidas despreciables, por lo que su implementación no supone un gran coste. El número de lámparas es 11, como se ha indicado en párrafos anteriores.

CLASE A+		Δp_x	Δp_y	Δp_z	P_{airsRef}	f_{sPref}
CASO 6	Impulsión	0	-112	100,5	4,0301	0,93
	Retorno	11,5	-108	100,5	3,2253	
CASO 7	Impulsión	0	-112	100,5	4,0301	0,95
	Retorno	11,5	-108	100,5	3,2253	

Tabla 19. Parámetros de clase energética de casos 6 y 7. Fuente: elaboración propia.

Como en este caso sólo se ha variado la potencia real consumida, únicamente ha tenido efecto sobre el factor de potencia absorbida. Añadir consumo hace que aumente, y que empeore la calificación energética de la climatizadora, como cabía esperar.

Si se optase por no despreciar las reducidas pérdidas del equipo, todavía se acentuaría más esta tendencia, como se ha visto en los casos de variación de pérdida de carga (tanto interna como externa).

4.8 CLIMATIZADORA DE HOSPITAL CON EQUIPO DE FOTOCATÁLISIS (CASO 8)

En este caso, en lugar de lámparas UV se emplean equipos de fotocátalisis. Se trabaja con 2 equipos Air Knight 14'', de la empresa Air Knight, preparados para 4.000 m³/h cada uno. Su instalación es posible en un plenum dentro de la UTA o en los conductos de aire de impulsión tras ésta. Su pérdida de carga también se considera despreciable.

		CASO 6		CASO 8	
		Impulsión	Retorno	Impulsión	Retorno
Caudal de aire	(m ³ /h)	8.000	8.000	8.000	8.000
Presión estática total	(Pa)	1.074	858	1.074	858
Presión estática interna	(Pa)	406	240	406	240
Consumo de Pot. activa	(kW)	3,79	2,95	3,83	2,95
Consumo anual	(€)	2.406,13		2.420,46	
Velocidad de referencia	(m/s)	1,4	1,53	1,4	1,56

Tabla 20. Climatizadoras de casos 6 y 8. Fuente: elaboración propia.

	$\Delta p_i/\Delta p_r$ (Pa)	Consumo anual		Pérdidas anuales	
		kWh	€	kWh	€
LÁMPARA UV	-	42,00	4,87	-	-

Tabla 21. Datos de un equipo de fotocátalisis, de los añadidos en el caso 8. Fuente: elaboración propia.

Los efectos sobre la climatizadora son similares a los del caso anterior, se tienen unos incrementos muy similares.

CLASE A+		Δp_x	Δp_y	Δp_z	P_{airsRef}	f_{sPref}
CASO 6	Impulsión	0	-112	100,5	4,0301	0,9290
	Retorno	11,5	-108	100,5	3,2253	
CASO 8	Impulsión	0	-112	100,5	4,0301	0,9345
	Retorno	11,5	-108	100,5	3,2253	

Tabla 22. Parámetros de clase energética de casos 6 y 8. Fuente: elaboración propia.

4.9 CLIMATIZADORA DE HOSPITAL CON FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO (CASO 9)

Se suelen añadir en extracción para tener opción a recircular parte de la corriente de extracción. De esta forma no se reintroducen en el aire de impulsión contaminantes gaseosos o malos olores.

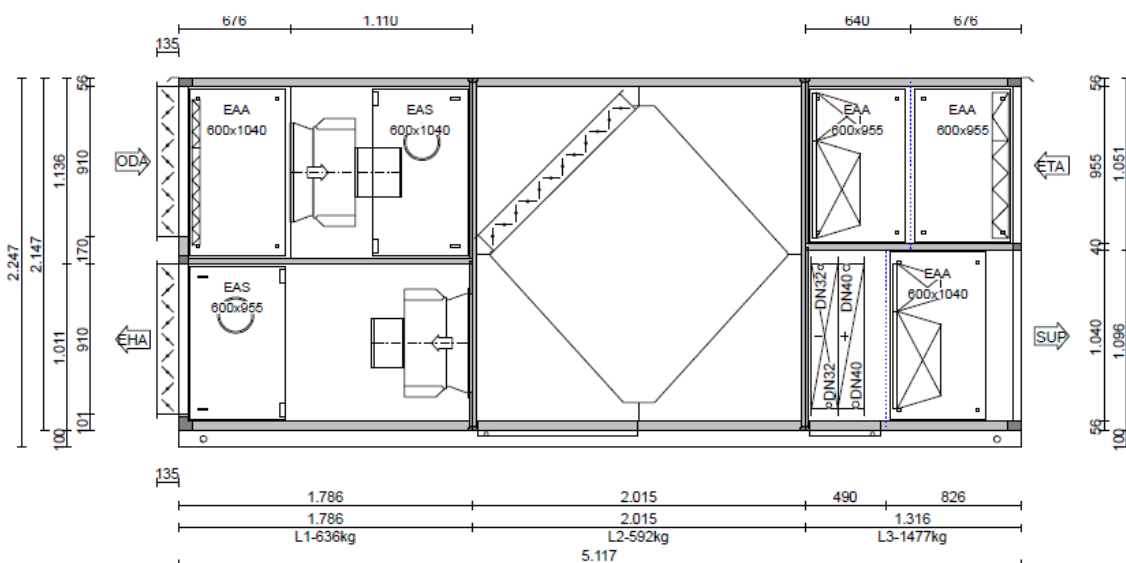


Fig. 11. Climatizadora de caso 9. Fuente: elaboración propia.

		CASO 5		CASO 9	
		Impulsión	Retorno	Impulsión	Retorno
Caudal de aire	(m³/h)	8.000	8.000	8.000	8.000
Presión estática total	(Pa)	706	490	706	681
Presión estática interna	(Pa)	406	240	406	431
Consumo de Pot. activa	(kW)	2,43	1,66	2,43	2,31
Consumo anual	(€)	1.460,13		1.692,18	
Velocidad de referencia	(m/s)	1,4	1,53	1,4	1,53

Tabla 23. Climatizadoras de casos 5 y 9. Fuente: elaboración propia.

	$\Delta p_i / \Delta p_f$ (Pa)	Consumo anual		Pérdidas anuales	
		kWh	€	kWh	€
FILTRO CARBÓN ACTIVADO	100 / 450	-	-	2.462,44	293,03

Tabla 24. Datos del filtro de carbón activado añadido en el caso 9. Fuente: elaboración propia.

CLASE A+		Δp_x	Δp_y	Δp_z	$P_{airsRef}$	f_{sPref}
CASO 5	Impulsión	0	-112	100,5	2,7442	0,88
	Retorno	11,5	-108	100,5	1,9129	
CASO 9	Impulsión	0	-112	100,5	2,7442	0,9
	Retorno	33,8	-108	100,5	2,5208	

Tabla 25. Parámetros de clase energética de casos 5 y 9. Fuente: elaboración propia.

Nuevamente se observan las tendencias del caso 3 donde también se modificó la pérdida de carga del interior de la climatizadora.

4.10 ADICIÓN DE UN FILTRO ELECTROSTÁTICO (CASO 10)

Esta modificación se realiza sobre la climatizadora inicial (caso 1). Se sustituye el filtro F8 por otro electrostático con una eficacia de retención similar. Así se ve la influencia de este cambio de tecnología sobre los costes y la clase energética.

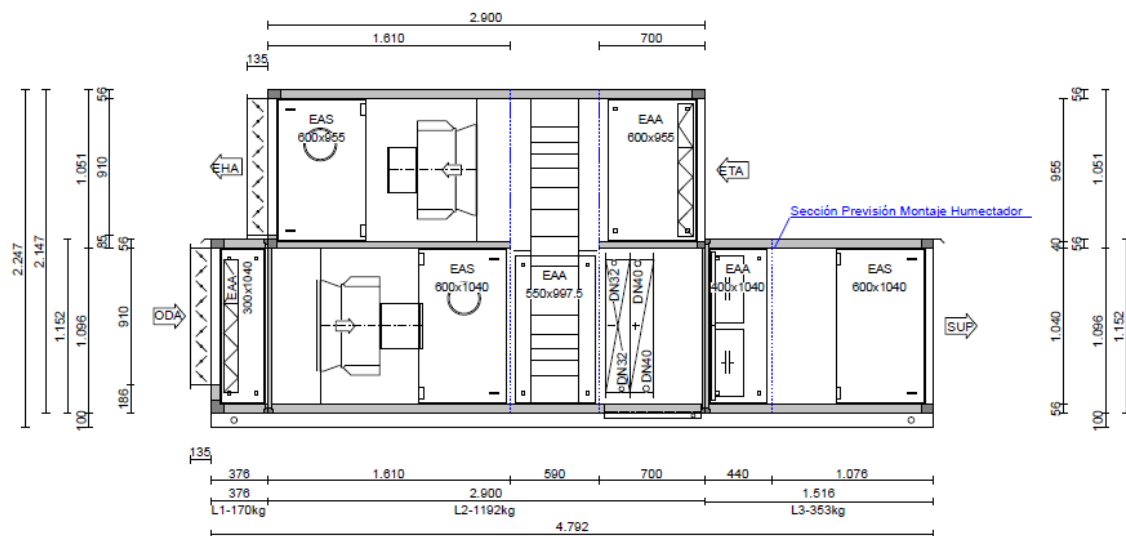


Fig. 12. Climatizadora de caso 10. Fuente: elaboración propia.

		CASO 1		CASO 10	
		Impulsión	Retorno	Impulsión	Retorno
Caudal de aire	(m³/h)	8.000	8.000	8.000	8.000
Presión estática total	(Pa)	673	469	587	469
Presión estática interna	(Pa)	373	219	287	219
Consumo de Pot. activa	(kW)	2,32	1,61	2,134	1,61
Consumo anual	(€)	1.403,01		1.336,61	
Velocidad de referencia	(m/s)	1,3	1,41	1,3	1,41

Tabla 26. Climatizadoras de casos 1 y 10. Fuente: elaboración propia.

La caída de presión interna disminuye. El consumo disminuye con ella a pesar de la potencia activa extra asociada al filtro electrostático.

	$\Delta p_i / \Delta p_r$ (Pa)	Consumo anual		Pérdidas anuales	
		kWh	€	kWh	€
FILTRO ELECTROSTÁTICO	22 / 22	312,00	37,13	232,80	27,70
FILTRO F8	58 / 158	-	-	1.055,93	124,41

Tabla 27. Datos del filtro electrostático añadido y del F8 eliminado en el caso 10. Fuente: elaboración propia.

Este filtro posee tanto consumo eléctrico como pérdida de carga apreciable. Los gastos de operación

CLASE A+		Δp_x	Δp_y	Δp_z	$P_{airsRef}$	f_{sPref}
CASO 1	Impulsión	-28,1	-134	40,2	3,0177	0,76
	Retorno	1	-129	40,2	2,1696	
CASO 10	Impulsión	-18,7	-134	40,2	2,6803	0,77
	Retorno	1	-129	40,2	2,1696	

Tabla 28. Parámetros de clase energética de casos 1 y 10. Fuente: elaboración propia.

En este último caso de cálculo se superponen dos efectos: la reducción de pérdidas de carga y el consumo adicional del equipo por su funcionamiento. Puesto que la velocidad en este equipo es reducida, la corrección por velocidad es menor a cero, aumentando con el cambio, como ya se ha visto en el caso 4. Al disminuir la presión estática global, la potencia de referencia también disminuye.

A pesar del extra de potencia eléctrica consumida por el equipo, el consumo global se reduce al disminuir mucho las pérdidas de carga. Pese a todo, dicho extra provoca que el factor de potencia absorbida aumente y, sorprendentemente la clase energética se ve ligeramente empeorada con un consumo menor.

4.11 COSTES DETALLADOS DE EQUIPOS DE FILTRACIÓN Y DESINFECCIÓN

Para poder comparar los costes de todas las tecnologías de filtrado se comparan los equipos anteriormente empleados y dimensionados para un caudal de 8.000 m³/h. La excepción son las lámparas UV, que dependen de la superficie a irradiar, dependiente de muchos más factores que el caudal de la climatizadora. Los precios de los equipos incluyen IVA.

Equipo de filtrado	Precio del equipo (€)	Vida útil	Consumo anual (€)	C. anual por pérdidas (€)	VAN (€)	VAN a perpet. (€)
Filtro M5	506,99	6 meses	0,00	76,30	-544,09	-29.449,77
Filtro M6	655,82	6 meses	0,00	89,02	-699,10	-37.840,14
Filtro F8	818,82	6 meses	0,00	125,66	-879,91	-47.626,93
Filtro F9	818,82	6 meses	0,00	159,27	-896,25	-48.511,51
Filtro H13	4.205,72	2 años	0,00	463,41	-5.082,26	-70.707,25
Filtro elect. F8	18.399,74	10 años	37,13	27,70	-18.930,86	-60.811,14
Filtro de carbón activado	1.355,18	1 año	0,00	293,03	-1.637,48	-44.729,14
11 Lámparas UV	133,00	3 años	62,83	0,00	-308,38	-2.913,22
2 Equipos de fotocátalisis	4.760,00	2 años	10,00	0,00	-4.779,15	-66.490,13

Tabla 29. Comparación de costes para cada tecnología. Fuente: elaboración propia.

Para filtros generales y absolutos, los costes aumentan progresivamente. En filtros absolutos se disparan bastante, pero su vida útil también es mayor. En los costes a perpetuidad se ve que se compensan estos dos factores, y el aumento de precio es bastante más sostenido.

El filtro de carbón activado es equivalente a un F8 o un F9 por costes a perpetuidad. Su mayor precio se compensa con su vida útil de 1 año. Cada filtro, dependiendo del material adsorbente puede tener un tiempo de vida particular, por lo que ninguno establece una tendencia general.

Las lámparas UV son muy económicas, e incluso en el caso de necesitar más unidades su coste es muchísimo más reducido que los equipos de fotocátalisis.

5. CONCLUSIONES

A la vista de los distintos contaminantes analizados la primera conclusión que se puede sacar es que el mantenimiento de una ventilación suficiente es fundamental en el mantenimiento de una buena calidad de aire interior. El aire viciado contiene una mayor cantidad de gases nocivos para la salud y posee una mayor carga de humedad que favorece la reproducción de los microorganismos presentes en el ambiente.

El mantener un nivel adecuado de ventilación se traduce en un caudal que puede resultar elevado. Dentro de lo posible (espacio disponible, limitaciones en el presupuesto, etc.) es recomendable dimensionar una climatizadora lo suficientemente grande para reducir las pérdidas en la circulación del aire por los distintos componentes.

En todos los equipos estudiados se ha visto que aumentar pérdidas con la adición de nuevos componentes tiene dos efectos negativos. El primero de ellos es el aumento del consumo eléctrico, pues se exige un mayor salto de presión al ventilador. El segundo es el aumento de los factores de potencia absorbida, que puede llegar a hacer disminuir la categoría energética de la climatizadora.

Usar cuando sea posible un filtro electrostático, pues el consumo combinado por pérdidas de carga y por consumo en su funcionamiento es menor que las pérdidas de carga de un filtro convencional con una eficiencia de retención similar. A largo plazo su coste es similar, por lo que dependerá de cada proyecto concreto la elección de uno u otro, así como de las características de cada modelo considerado. Pese a la menor pérdida de carga, el consumo eléctrico adicional hará disminuir la calificación energética de la climatizadora.

Se ha visto que introducir filtros absolutos conlleva un aumento considerable de los costes de operación, así como por su adquisición. Su uso en instalaciones con salas blancas es obligatorio por normativa, pero fuera de éstas no es especialmente adecuado su uso. Industrias con presencia de estas salas son la alimentaria, sanitaria, farmacéutica, de alta tecnología e instalaciones de I+D+I.

Si se quiere proteger de virus y otros microorganismos el aire de impulsión en ventilación general es mucho más adecuado el no recircular el aire en ningún caso (para que los posibles contaminantes del aire de extracción no accedan de nuevo a la corriente de impulsión) y el usar un recuperador de calor que no presente fugas.

En el caso de optar por un equipo de desinfección, el uso del ozono está desaconsejado por los problemas que conlleva para la salud y por la poca efectividad que presenta usarlo en concentraciones de seguridad. Es una tecnología útil al requerir de desinfección de espacios en momentos en que no haya personas presentes, pero no en la mayoría de sistemas de climatización.

Se desaconseja también el uso de equipos de fotocátalisis, pues su precio es bastante elevado. Se prefiere el empleo de lámparas UV libres de ozono, pues además de ser equipos de tamaño reducido que tan apenas introducen pérdidas adicionales permiten su instalación en puntos críticos del sistema de climatización (puntos de concentración y generación de microorganismos). Asegurarse de que su instalación no provoca exposición de las personas a radiación UV-C, altamente dañina.

6. PROTOTIPO DE ENSAYO. MODIFICACIÓN POR COVID-19

El proyecto actual fue modificado debido al Covid-19. Antes de la modificación se iba a construir un prototipo sencillo de climatizadora sobre el cual realizar diversos ensayos de cara a obtener datos experimentales que añadir a los cálculos del proyecto.

El prototipo habría sido parecido al de la imagen:

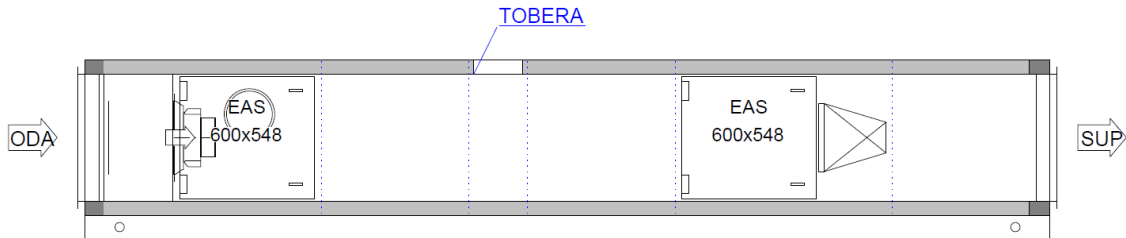


Fig. 13. Prototipo de ensayo. Fuente: elaboración propia.

De izquierda a derecha se iban a tener los siguientes elementos:

- Un ventilador axial para hacer circular un caudal de unos 1.000 m³/h, con tomas para la medida de la caída de presión en el mismo para medición de ese mismo caudal.
- Una sección en la cual habría montado un sistema de inyección de polvo sintético (indicado como tobera en la imagen, en la cual estaría montado).
- Una sección vacía en la cual se repartiesen las partículas en la corriente de aire, en la que se montaría además, un contador óptico de partículas (COP).
- La sección de montaje de los filtros de ensayo.
- Una segunda sección de conteo de partículas, aguas abajo del filtro de ensayo.

Sobre este prototipo se habrían ensayado varios filtros mecánicos y alguno electrostático. Se habrían medido consumos en el ventilador, concentración de partículas en ambos lados del filtro y pérdidas de carga en éste.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

-
- [1] Marta Morales, I., Blanco Acevedo, V., & García Nieto, A. (2010). *Calidad del Aire Interior en edificios de uso público*. Dirección General de Ordenación e Inspección. Consejería de Sanidad de la Comunidad de Madrid.
- [2] AECC. (s.f.). *Radón y cáncer. Qué es y efectos sobre la salud*. Obtenido de <https://www.aecc.es/es/todo-sobre-cancer/prevencion/radon>
- [3] Consejo de Seguridad Nuclear. (s.f.). *Mapa del potencial de radón en España*. Obtenido de <https://www.csn.es/mapa-del-potencial-de-radon-en-espana>
- [4] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España. (s.f.). *Proyecto de Real Decreto por el que se modifica el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación*. Obtenido de <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-documentos-complementarios/357-proyecto-modificacion-cte-julio-2018.html>
- [5] Sahu, S., Tiwari, M., Bhangare, R., & Pandit, G. (2012). *Particle Size Distribution of Mainstream and Exhaled Cigarette Smoke and Predictive Deposition in Human Respiratory Tract*.
- [6] Luis, G., Hernández, C., Rubio, C., Frías, I., Gutiérrez, A., & Hardisson, A. (2009). *Toxicología del Asbesto*.
- [7] Encyclopedia Britannica. (2019). *Bacteria / Cell, Evolution & Classification*. Obtenido de <https://www.britannica.com/science/bacteria>
- [8] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (s.f.). *Penicillium spp*. Obtenido de <https://www.insst.es/documents/94886/353749/Penicillum+spp+2017.pdf/57121544-9157-4bbe-a6eb-b394c83bf9e1>
- [9] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (s.f.). *Aspergillus spp*. Obtenido de <https://www.insst.es/documents/94886/353749/Ficha+Aspergillus+spp.pdf/fc87d0c4-023a-4dda-95dc-cd26d346e1f2>
- [10] Carrillo, L. (2003). *Los hongos de los alimentos y forrajes*. Salta: Universidad Nacional de Salta.
- [11] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (s.f.). *Cladosporium spp*.
- [12] Ministerio de Sanidad. Gobierno de España. (2020). *Recomendaciones de operación y mantenimiento de los sistemas de climatización y ventilación de edificios y locales para la prevención de la propagación del SARS-CoV-2*.
- [13] Organización Mundial de la Salud. (2020). *Laboratory biosafety guidance related to coronavirus disease (COVID-19)*.

-
- [14] Liu, Z., Ma, S., Cao, G., Meng, C., & He, B.-J. (2018). *Distribution characteristics, growth, reproduction and transmission modes and control strategies for microbial contamination in HVAC systems: A literature review.*
- [15] Organización Mundial de la Salud. (2009). *Hazard Prevention and Control in the Work Environment: Airborne Dust.*
- [16] Lu, Z., Lu, W., Zhang, J., & Sun, D. (2009). *Microorganisms and particles in AHU systems: Measurement and analysis.*
- [17] Siegel, J. A., & Nazaroff, W. W. (2003). *Predicting particle deposition on HVAC heat exchangers.*
- [18] ¿Qué es un Fan Coil? (s.f.). Obtenido de <https://www.geotermiavertical.es/fan-coil/>
- [19] Protechnik. (s.f.). Obtenido de <https://www.protechnik.com.pe/>
- [20] General Filter. (s.f.). Obtenido de <https://www.generalfilter.com/es/>
- [21] Smart Air Filters. (s.f.). Obtenido de <https://smartairfilters.com/en/>
- [22] Fuji Electric. (s.f.). Obtenido de <https://www.fujielectric.com/>
- [23] Mhemeed, A. (2018). *A General Overview on the Adsorption.*
- [24] Nevárez-Martínez, M., Espinoza-Montero, P., Quiroz-Chávez, F., & Ohtani, B. (2017). *Fotocatálisis: inicio, actualidad y perspectivas a través del TiO₂.*
- [25] ASHRAE. (2015). *ASHRAE Position Document on Filtration and Air Cleaning.*
- [26] AIRE PURO. (s.f.). *Filtro Gases Partículas / Aire Puro.* Obtenido de <https://www.airepuro.cat/>
- [27] ASHRAE. (2015). Eurovent Certita Certification.
- [28] EUROVENT. (2018). *Energy Efficiency Evaluation of Air Filters for General Ventilation Purposes.*
- [29] Camfil. (s.f.). *Products / Camfil.* Obtenido de <https://www.camfil.com/en/products>
- [30] Expansion Electronic. (s.f.). *Air Treatment Solutions - Expansion Electronic.* Obtenido de <https://www.expansion-electronic.eu/index.php/en/products/air-treatment-solutions>
- [31] OSRAM. (s.f.). *Aplicaciones profesionales e industriales / OSRAM.* Obtenido de https://www.osram.es/pia/aplicaciones/industry/purification/air_purification.jsp

-
- [32] Air Knight. (s.f.). *Air Knight*. Obtenido de <https://www.airknightiaq.com/air-knight/#>
- [33] ASHRAE. (2019). Ultraviolet Air and Surface Treatment. En *ASHRAE Handbook - HVAC Applications* (págs. 62.1-62.17).